

## **Análise quantitativa da perda de massa por oxidação em barras de aço carbono CA-50: Uma proposta metodológica para a contextualização do estudo da corrosão em cursos de engenharia civil/IFS**

**LOPES, Francisco Luiz Campos<sup>1\*</sup>; MONTEIRO, Michael Douglas Santos<sup>2</sup>;  
MELO, Henrique Carvalho Santos<sup>1</sup>; SIQUEIRA, Luan Martins<sup>1</sup>;  
LOPES, Francisco Luiz Gumes<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Coordenação de Engenharia Civil, Instituto Federal de Sergipe;

<sup>2</sup> Coordenação de Licenciatura em Química, Instituto Federal de Sergipe;

\* Autor de correspondência. E-mail: francisco.campos.lopes@gmail.com

### **RESUMO**

A patologia da corrosão em armaduras de aço é um dos principais fatores que causam a perda de desempenho estrutural nas construções de concreto armado. Algumas dessas problemáticas afetam a sociedade de forma drástica. É necessário que os profissionais detenham o conhecimento fundamental em relação a essa área de atuação. A pesquisa objetivou desenvolver uma proposta metodológica para contextualizar a patologia da corrosão em armaduras de concreto armado, de forma a possibilitar a compreensão e interpretação dos cálculos eletroquímicos regidos pelas Leis de Faraday. Aplicou-se um questionário de conhecimentos prévios a discentes do curso de engenharia civil do Campus Aracaju/IFS a fim de se obter uma visão macro da compreensão dos mesmos a respeito da ocorrência da corrosão em elementos estruturais. Para o desenvolvimento da parte experimental, foi escolhido o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM). O ensaio permitiu uma análise rápida do processo corrosivo, possibilitando a avaliação visual da intensidade de corrosão ao longo do tempo, que caracteriza a dinâmica desse processo, e a compreensão dos processos que ocorrem nas armaduras de concreto armado, permitindo o cálculo e a comprovação da deterioração do processo corrosivo em barras de aço carbono CA-50. Esta proposta metodológica permitirá agregar ao discente e ao docente de cursos de engenharia civil uma formação mais sólida e abrangente a respeito dos processos corrosivos, mediante a experimentação.

**Palavras-chave:** Patologia das construções; Corrosão em aço carbono; Ensaio CAIM.

### **Corrosion analysis in carbon steel bars CA-50: a methodological proposal for the contextualization of the study of corrosion in civil engineering courses/IFS**

### **ABSTRACT**

The pathology of corrosion in steel reinforcement is one of the main factors that cause the loss of structural performance in the constructions of reinforced concrete. Some of these issues affect society in a drastic way. It is necessary that the professionals have the fundamental knowledge in relation to this area of activity. The research aimed to develop a methodological proposal to contextualize the corrosion pathology in reinforced concrete reinforcement, in order to allow the understanding and interpretation of the electrochemical calculations governed by Faraday Laws. A prior knowledge questionnaire was applied to students of the civil engineering course of Campus Aracaju/IFS in order to obtain a macro view of their understanding of the occurrence of corrosion in structural elements. For the development of the experimental part, the modified Immersion Accelerated Corrosion Test (CAIM) was chosen. The test allowed a rapid analysis of the corrosive process, allowing the visual evaluation of the corrosion intensity over time, which characterizes the dynamics of this process, and the understanding of the processes that occur in reinforced concrete reinforcement, allowing the calculation and proof of the deterioration of the corrosion process on CA-50 carbon steel bars. This methodological proposal will allow a more solid and comprehensive training on corrosive processes to be added to the student and teacher of civil engineering courses through experimentation.

**Keywords:** Pathology of buildings; Corrosion in carbon steel; CAIM test.

## 1 Introdução

A patologia da corrosão em armaduras de aço é um dos principais fatores que causam a perda de desempenho estrutural nas construções de concreto armado. A perda de seção e massa sofrida pelo aço e o efeito dos óxidos expansivos resulta no comprometimento do tempo de vida útil da estrutura. Já, desde 1978, Andrade e Gonzalez constataram que os custos econômicos diretos da corrosão eram estimados em 1,25 e 3,5% do produto interno bruto de um país desenvolvido. Helene, em 1993, concluiu que 52% das manifestações patológicas registradas em estruturas eram oriundas de processos corrosivos do aço carbono.

Dessa forma, é imprescindível manter a durabilidade do concreto para suas diversas aplicações nas construções. Algumas dessas problemáticas afetam a sociedade de forma drástica, tal como em Sergipe, onde a patologia da corrosão é bastante presente pelo fato de sua geografia litorânea.

Segundo laudos técnicos do CREA-SE e da Defesa Civil do estado, a queda da peça metálica do Shopping Jardins em Aracaju (2016), que resultou na morte de um estudante, o desabamento da ponte José Américo de Almeida em Pedra Branca (2015), a ruína da caixa d'água em Doris (2017), que levou duas crianças de 6 anos a óbito, e o desabamento do camarote da Odonto Fantasy em Aracaju (2017) foram provocados pela corrosão de suas estruturas, resultado da falta de manutenção.

O colapso da ponte Riccardo Morandi em Gênova, Itália (2018), é o exemplo mais marcante que ressalta a necessidade do estudo, prevenção e combate da patologia da corrosão estrutural, o incidente levou 43 pessoas a óbito. De acordo com os laudos técnicos, o menosprezo da concessionária, responsável pela ponte, em relação às manutenções resultou na tragédia.

Mesmo que seja impossível, com as tecnologias atuais, impedir totalmente a penetração de agentes agressivos à estrutura, faz-se de imensa importância a manutenção das estruturas ao longo do tempo para que, com as ações corretas, reduza-se cada vez mais a quantidade de problemas relacionada à patologia em estudo.

É necessário que os profissionais da construção civil apresentem o conhecimento fundamental em relação a essa área de atuação. No entanto, o curso engenharia civil do Campus Aracaju/IFS, aborda essa temática somente na disciplina de patologia das construções, obrigatória no currículo.

Na referida disciplina, abordam-se estudos de casos da patologia da corrosão. O discente, porém, fica sem os conteúdos necessários básicos na área de eletroquímica, tais como

a representação das celas eletroquímicas, identificação dos eletrodos e potenciais de oxidação, leis da eletrólise, além de não ter nenhuma experiência prática sobre o processo corrosivo, não obtendo assim, a capacitação necessária para interpretar as informações obtidas pelos aparelhos, tornando-se refém de artigos com casos semelhantes estudados.

Diante disso, o projeto objetivou desenvolver uma proposta metodológica experimental para contextualizar a patologia da corrosão em armaduras de concreto armado, de forma a possibilitar a compreensão e interpretação dos cálculos eletroquímicos regidos pelas Leis de Faraday e disponibilizá-la para os discentes dos cursos de Engenharia Civil do Campus Aracaju/IFS.

## 2 Metodologia

### 2.1 Questionário de Conhecimentos Prévios

Para se obter uma visão macro da compreensão dos discentes de engenharia civil sobre a corrosão em elementos estruturais, aplicou-se um questionário de conhecimentos prévios (QCP), com cinco perguntas objetivas, a 11 alunos e ao docente da matéria de patologia das construções (Tabela 1).

Tabela 1 – Questionário de Conhecimentos Prévios

01	Qual a importância do estudo da patologia da corrosão nos cursos de engenharia civil?
02	Somente com o estudo da disciplina de patologia das construções é possível adquirir o conhecimento necessário para a identificação e análise de processos corrosivos em estruturas?
03	A utilização de experimentos com ensaios destrutivos agregaria conhecimentos para sua formação?
04	O estudo da eletroquímica é necessário para a análise de dados na patologia de corrosão em estruturas?
05	O PPC (projeto Pedagógico Curricular) do curso de engenharia civil no IFS/ <i>Campus</i> Aracaju, proporciona subsídios necessários para o formando atuar na área de patologias das construções como engenheiro?

### 2.2 Descrição da metodologia experimental

De forma a possibilitar a execução de uma atividade experimental atrativa, de fácil compreensão e que proporcione a abordagem de conteúdos básicos utilizados na eletroquímica, utilizou-se o ensaio de corrosão acelerada por imersão modificada (CAIM).

O ensaio permite uma análise rápida do processo corrosivo e possibilita a avaliação visual da intensidade de corrosão ao longo do tempo (Torres, 2006).

Assim, possibilita de forma concreta e efetiva a avaliação dos efeitos da corrosão em armaduras de aço, através do ensaio gravimétrico da mesma.

## **2.3 Preparação dos Corpos de Prova**

Cortou-se um vergalhão de 1 metro em 4 pedaços de 20 cm, simulando um ambiente semelhante às construções efetivadas em diversos locais.

Usou-se barras CA-50 de diâmetro de 12,5 mm. As barras devem passar por uma limpeza mecânica realizada com escovas de aço e por uma limpeza química, normatizada pela ASTM G1-90, onde mergulham-se as barras por 10 a 15 minutos na solução CLARK (20 g de trióxido de antimônio, 50 g cloreto estanhoso e 1 L de HCl).

Durante este procedimento é importante ressaltar o quão é importante a aferição da massa inicial de cada barra e seus respectivos diâmetros efetivos para a realização do ensaio gravimétrico e a avaliação da perda de seção, de forma a obter resultados precisos. Deve-se etiquetar cada barra para sua identificação, de forma a não prejudicar a realização da prática e a compreensão dos fatos ocorridos.

## **2.4 Sistema para realização do ensaio CAIM**

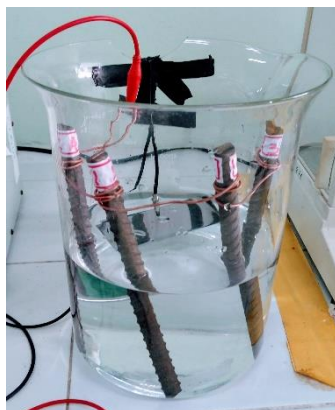
Os materiais que devem ser utilizados precisam oferecer um suporte seguro e que permita a visualização dos processos. Deve-se operar o ensaio com um aquário ou béquer que permita a imersão de  $\frac{2}{3}$  da barra na solução salina. No ensaio realizado foi utilizado um béquer de 3,5L.

Para permitir uma simulação de um ambiente altamente agressivo preparou-se uma solução salina com 4,76% de cloreto de sódio (50g de NaCl P.A para 1L de água destilada). No processo, para permitir ao estudante observar a patologia em um tempo reduzido, utilizou-se a impressão de corrente. Deve-se usar uma fonte de alimentação de tensão, no ensaio foi utilizada a Hikari HF-3003 Skmki88.

As barras foram ligadas ao pólo positivo da fonte onde ocorrerá a oxidação (ânodo), e no pólo negativo, onde ocorre a redução, conecta-se uma placa de aço galvanizado (cátodo). A figura 1 mostra a disposição do sistema montado.

Nesta etapa do experimento deve-se contextualizar os conteúdos básicos da eletroquímica, tais como a montagem das células eletroquímicas, identificação dos pólos, dos potenciais de redução e das reações que ocorrem.

Figura 1 – Representação do sistema montado



Fonte: Autoria própria

Na sequência, de forma a contextualizar para o discente o processo que ocorrerá com a aplicação da densidade de corrente de corrosão ( $I_{app}$ ), deve-se abordar as Leis de Faraday, comprovando-a mediante o cálculo da perda de massa nas barras de aço.

A densidade de corrente de corrosão é uma unidade que relaciona a corrente elétrica impressa nas barras, pela área de aço submetida à indução, representada por  $A/cm^2$ .

No ensaio utilizou-se uma tensão de 4,7V e uma amperagem de 3,34A. O ensaio pode ter sua duração definida pelo professor a depender do seu objetivo. Para resultados mais expressivos, as barras foram submetidas à aceleração por 5 horas.

## 2.5 Realização do ensaio gravimétrico e de perda de seção

Baseando-se nos estudos de Cascudo (1997), realizou-se o método gravimétrico que é utilizado em laboratórios visando quantificar a deterioração a partir da determinação da perda de massa dos metais, após a decorrência de um tempo definido de propagação do fenômeno da corrosão.

Finalizada a impressão de corrente, as barras passam novamente por uma limpeza química e pesagem da massa para a análise da perda de massa e seção. Deve-se calcular somente a perda de massa e seção sofrida pela parte imersa da barra, isto é, considera-se apenas a parte imersa como afetada pela corrosão, faz-se então a proporção da massa oriunda dos  $\frac{2}{3}$  da barra, antes e depois do ensaio, e assim aplica-se para determinação do diâmetro efetivo.

## 2.6 Análise visual durante o ensaio

O tempo que uma estrutura pode resistir às ações das condições propostas são critérios fundamentais para a compreensão da atuação da dinâmica do processo corrosivo nas armaduras

de uma construção. Realizou-se uma análise qualitativa, com base em análises visuais, de como as barras se comportaram durante o processo corrosivo.

Esta etapa do experimento permite aos discentes a visualização detalhada de como o processo corrosivo afeta as estruturas metálicas.

No experimento realizado, após os 5 primeiros minutos do ensaio, foi observado que a solução obteve cor alaranjada, por haver pequenas partículas que se desprendem da superfície da barra, dando cor à solução (Figura 2).

Após 30 minutos a solução obtém cor acinzentada, o fluxo de partículas sólidas na solução se torna mais intenso e surgem, em certas áreas, pequenas escamas formados por produtos de corrosão, que aos poucos se desprendem da superfície da barra, liberando partículas maiores de coloração escura (Figura 3).

Ressalta-se a necessidade de estimular os discentes a relatarem o maior número de observações visualizadas, de forma a compararem com as descrições teóricas disponibilizadas na literatura.

Figura 2 – Solução com 5 minutos



Fonte: Autoria própria

Figura 3 – Solução com 30 minutos

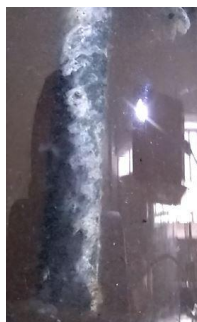


Fonte: Autoria própria

Com 1 hora de ensaio já se pode tornar perceptível o aumento do volume da barra devido aos óxidos expansivos. Uma película branca surge na superfície da barra, devido ao depósito de sais e, no fundo do béquer, ocorre um depósito dos produtos de corrosão (Figura 4).

Após 2 horas, a barra apresenta uma película formada pelos produtos de corrosão. O deslocamento da película libera grande quantidade de resíduos (Figura 5).

Figura 4 – Solução com 1h



Fonte: Autoria própria

Figura 5 – Solução com 2h



Fonte: Autoria própria

Com 3 horas de ensaio o depósito de produtos de corrosão no fundo do béquer se torna maior, a película de corrosão não deslaca e torna-se mais espessa (Figura 6). Transcorridas 4 horas de ensaio a película formada se apresenta mais coesa (Figura 7).

Figura 6 – Solução com 3h



Fonte: Autoria própria

Figura 7 – Solução com 4h



Fonte: Autoria própria

## 2.7 Resultado do ensaio gravimétrico e da perda de seção

Na sequência do experimento, os discentes devem elaborar uma tabela com a perda de massa, tal como a Tabela 2 e uma com relação a diminuição do diâmetro, Tabela 3.

Tabela 2 – Perda de massa sofrida

Barra	Massa da barra (g) (antes)	Massa da barra (g) (depois)	Perda de massa (g)	Percentual da perda de massa (%)
1	108,94	102,15	6,79	6,23
2	106,79	104,13	2,66	2,49
3	103,91	101,81	2,10	2,02
4	109,32	102,16	7,16	6,55
<b>TOTAL</b>	<b>428,96</b>	<b>410,25</b>	<b>18,71</b>	<b>4,36</b>

Com os resultados gravimétricos, deve-se fazer o cálculo da taxa de corrosão, conforme mostra a Equação (1). A taxa de corrosão oferece uma análise da intensidade da corrosão. No ensaio obteve-se uma taxa de corrosão igual a 21,26 mg/cm<sup>2</sup> por hora.

$$T_{corr} = (W_I - W_F) / (A \cdot t) \quad (1)$$

Em que:

$W_F$ :	Massa final	[g]
$W_I$ :	Massa inicial	[g]
A:	Área submetida à corrosão	[cm <sup>2</sup> ]
t:	Tempo	[s]



Tabela 3 – Perda de diâmetro

Barra	Diâmetro efetivo (mm) (antes)	Diâmetro efetivo (mm) (depois)	Perda de seção (%)
1	12,44	12,04	3,21
2	12,42	12,26	1,29
3	12,43	12,30	1,04
4	12,34	11,93	3,32

## 2.8 Análise da perda de massa teórica de Ferro usando a lei de Faraday

Segundo Ahmad (2009), a massa de ferro produzida por unidade de área da superfície da barra de aço devido à aplicação de corrente, sob certo tempo, pode ser determinada usando Equação (2), baseada na lei de Faraday:

$$W_{th} = (W_M \cdot I_{app} T) \cdot F^{-1} \quad (2)$$

Em que:

$W_{th}$ : Massa teórica de ferro produzida por unidade de área da superfície [g /cm<sup>2</sup>]

$W_M$ : Massa entre a massa atômica do ferro e a valência do mesmo [28g]

$I_{app}$ : Densidade de corrente aplicada [A/cm<sup>2</sup>]

$T$ : Tempo de aplicação da corrente [s]

$F$ : Constante de Faraday [96480 A.s]

Nesta etapa, é importante que o docente contextualize os processos de eletrólise e enfatize a aplicação das Leis de Faraday.

A aplicação das Leis de Faraday para o ensaio forneceu uma perda de massa de ferro de 17,44 g, com uma taxa de corrosão de 19,81 mg/cm<sup>2</sup> por hora. Como a perda de massa de ferro obtida no ensaio foi de 18,71 g, obteve-se uma diferença de 1,27g da projeção teórica para a perda de massa real, ou seja, um erro de apenas 6,78%.

## 2.9 Densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ )

De forma congruente, utilizando os estudos de Ahmad (2009), pode-se afirmar que a densidade de corrente de corrosão equivalente ( $I_{corr}$ ) pode ser determinada assumindo que a perda de massa teórica e a perda de massa real de ferro são iguais, considerando a teórica como sendo a verdadeira. A partir da Equação (3) temos uma densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) igual a 18,956 mA/cm<sup>2</sup>:

$$I_{corr} = [(W_{th}) \cdot F] / (\pi \cdot D \cdot L \cdot W_M \cdot T) \quad (3)$$

Em que:

$W_{th}$ :	Massa teórica de ferro produzida por unidade de área da superfície	[g /cm <sup>2</sup> ]
$W_M$ :	Massa entre a massa atômica do ferro e a valência do mesmo	[28g]
$I_{corr}$ :	Densidade de corrente de corrosão induzida equivalente	[A/cm <sup>2</sup> ]
T:	Tempo de aplicação da corrente	[s]
F:	Constante de Faraday	[96480 A.s]
D:	Diâmetro da barra	[cm]
L:	Comprimento da barra	[cm]

### 3 Resultados e Discussão

Tonche (2014), Araujo (2015) e Marques et. al. (2008), demonstraram que as compreensões dos conteúdos e suas aplicabilidades são necessárias para criar uma conexão entre teoria e prática, além de reduzir um grande obstáculo que é a abstração de conceitos passados em sala de aula, inviabilizando uma relação entre o conhecimento e a compreensão do mesmo.

A análise do QCP permitiu verificar que todos os discentes classificaram o estudo da patologia da corrosão como muito importante. Mais da metade, 58%, afirmaram que somente possuíam conhecimentos para a identificação da patologia, não sendo possível identificar e analisar os processos corrosivos em estruturas e 25% relataram que não se consideravam aptos para opinar sobre a patologia. Foi possível inferir que os discentes possuem apenas uma compreensão básica e fraca do assunto sem o devido aprofundamento.

Para 67% dos estudantes, a utilização de experimentos com ensaios destrutivos agregaria conhecimentos para sua formação, possibilitando uma melhor visualização dos efeitos da patologia, enquanto que 25% admitiram a importância, porém, assinalaram não possuem os conhecimentos necessários para realização de ensaios na área de patologia. Verifica-se que os alunos possuem interesse na metodologia experimental para uma melhor compreensão das patologias. O docente da matéria ao responder essa pergunta ressaltou a falta de tempo na disciplina, dificultando a introdução de atividades práticas.

A maioria dos alunos, 92%, considerou necessário o ensino da eletroquímica para a análise de dados na patologia de corrosão em estruturas, mostrando que os mesmos associam o processo corrosivo a um processo eletroquímico.

Em relação ao PPC do curso de engenharia civil no IFS/*Campus* Aracaju, 58% dos discentes afirmaram que o mesmo proporciona subsídios necessários para o formando atuar na área de patologias das construções como engenheiro, porém, ressaltando a necessidade de maior

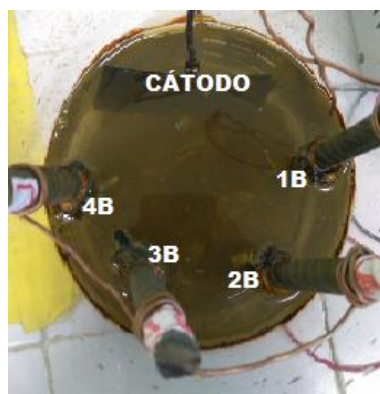
aprofundamento no assunto. Este resultado mostra a lacuna presente no curso, com isso o engenheiro fica dependente de especialistas e estudos de casos para obter um referencial teórico e prático de estudo.

O ensaio CAIM correspondeu a uma simulação de uma corrosão uniforme e constante, sendo gerada apenas pelo fenômeno eletroquímico, onde não ocorre a influência do pH. Os dados experimentais e teóricos divergiram entre si com variações menores que 7%, indicando que o referencial teórico para a corrosão pode ser utilizado para uma projeção do processo, onde suas variáveis possam ser correlacionadas com a realidade.

Após a realização do ensaio, foi constatado que a parte das barras que não foi imersa na solução não apresentou perda de massa ou seção. Esse fato foi devido à oxigenação da solução, que fez com que somente as partes submersas da barra sofressem com o processo corrosivo, tornando perceptível a ação do oxigênio no processo corrosivo para os estudantes.

As barras (ânodo) estavam dispostas com diferentes distâncias da placa de aço galvanizado (cátodo), as que estavam mais próximas tiveram maior perda de massa, pois apresentavam menor resistência para a migração de íons devido à distância entre os pólos (figura 8), possibilitando ao aluno perceber a influência do cobrimento do concreto sobre o aço durante o processo corrosivo, tal como a distância entre as armaduras na estrutura.

Figura 10. Disposição das barras no béquer durante ensaio



Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado por Dominguez (1975) e Amaral (1996), para a melhoria da qualidade do ensino, é de fundamental importância a adoção de uma metodologia de ensino que privilegie a experimentação como uma forma de aquisição de dados da realidade.

Outro fator de fundamental relevância para a compreensão dos fenômenos eletroquímicos é a abordagem da relação entre a densidade de corrente de corrosão aplicada ( $I_{app}$ ) e a densidade de corrosão induzida equivalente ( $I_{corr}$ ). A  $I_{app}$  não é totalmente eficiente em

ocasionar a perda de massa igual à  $I_{corr}$ , baseada na lei de Faraday. Ressalta-se para os estudantes que o tempo necessário, para uma mesma taxa de corrosão, é menor se calculada com a  $I_{corr}$ , pois a  $I_{app}$  demanda de certo tempo para que haja a despassivação da barra de aço, assim  $I_{corr} < I_{app}$ .

A Tabela 4 permite a visualização das divergências dos resultados obtidos no ensaio com os resultados obtidos teoricamente:

Tabela 4 - Divergência entre os resultados obtidos

	Resultado do ensaio	Resultado teórico	Divergência (%)
<b>Perda de massa (g)</b>	18,71	17,44	6,78
<b>Densidade de corrente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	18,96	18,95	0,053
<b>Taxa de corrosão (mg/cm<sup>2</sup> por hora)</b>	21,26	19,81	6,82

#### 4 Considerações finais

A patologia da corrosão em armaduras de aço é um dos principais fatores que causam a perda de desempenho estrutural nas construções de concreto armado. É necessário a aplicação de ações concretas para que se prolongue a vida útil das armaduras de aço atacadas pela patologia em estudo.

É necessário que os profissionais da construção civil apresentem um conhecimento mínimo em relação a essa área de atuação. Foi verificado que os discentes do curso de engenharia civil do Campus Aracaju/IFS não possuem conhecimento suficiente para identificar e analisar os processos corrosivos em estruturas, que a utilização de experimentos com ensaios destrutivos agregaria conhecimentos para sua formação e que o estudo da eletroquímica possibilita a análise de dados na patologia de corrosão em estruturas.

Portanto, a proposta metodológica apresentada possibilita a análise e a compreensão de processos eletroquímicos que ocorrem nas estruturas de concreto armado. Viabiliza o estudo das celas eletroquímicas com visualização e comprovação da corrosão em barras de aço carbono CA-50 de maneira eficiente, com a possibilidade efetiva de cálculos e comparações com as Leis de Faraday.

Esta proposta metodológica permitirá agregar ao discente uma formação mais sólida e abrangente a respeito dos processos corrosivos e dos estudos de patologias ocasionadas pela corrosão, minimizando o hiato entre a real necessidade da compreensão desses fenômenos e o que de fato está proposto no projeto pedagógico do curso de engenharia civil do Campus Aracaju/IFS.

